

روش های آکوستیکی و ارتعاشی برای تعیین نشتی لوله های آب مدفون در خاک

سیدامیدرضا زاهدی فرد

عباس رهی*

دانشجوی کارشناسی

دانشیار

دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه

دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه

شهید بهشتی

شهید بهشتی

omidreza.zahedi@gmail.com

a_rahi@sbu.ac.ir

چکیده

نشتی در لوله های آب مدفون منجر به افزایش تلفات آب و کاهش کارایی شبکه های توزیع می شود. با توجه به محدودیت های موجود در منابع آب های سطحی و زیرزمینی، شرایط جغرافیایی و اقلیمی خاص، و همچنین فرسودگی سامانه توزیع آب شهری، مشکل نشت آب و مشکلات مرتبط با آن به ویژه در شبکه های آبرسانی افزایش می یابد. از سوی دیگر، استفاده نکردن از لوله ها و اتصالات استاندارد باعث می شود تا کنترل نشت و شناسایی آن دشوارتر شود. در نتیجه، توجه به استفاده از روش های مختلف برای شناسایی و کنترل نشت آب اهمیت زیادی پیدا کرده است. امروزه، با پیشرفت های علمی و فناوری، امکان شناسایی دقیق محل نشت آب بدون نیاز به حفاری های پرهزینه و زمان بر و بدون نیاز به علائم ظاهری از نشت در سطح زمین وجود دارد. در بسیاری از کشورهای پیشرفته، سامانه های نشت یاب برخط به عنوان ابزارهایی برای کنترل هدررفت آب مورد استفاده قرار می گیرند. به همین دلیل، عملکرد و کارایی این دستگاه ها که جدیدترین فناوری های جهانی در آن ها به کار رفته، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. در این مطالعه، روش های نشتی یابی سامانه لوله-خاک بررسی و با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج این پژوهش بر ضرورت انتخاب روش نشتی یابی بر اساس شرایط فیزیکی شبکه تأکید دارد.

واژگان کلیدی: نشت آب، روش های شناسایی نشتی، لوله های آب مدفون، روش ارتعاشی، روش آکوستیک.

۱. مقدمه

گفته می شود که موجب رسیدن آب از یک منبع به دست مصرف کننده می شوند. شبکه توزیع آب شهری از قسمت های مختلفی تشکیل می شود که عمده ترین آنها پمپ ها - مخازن ذخیره آب - لوله ها و شیرآلات و قطعات و اتصالات آب می باشد. نشت آب از خطوط

نشتی در لوله های آب مدفون یکی از مهم ترین چالش های فنی، اقتصادی و مدیریتی در شبکه های توزیع آب شهری و صنعتی به شمار می رود. شبکه توزیع آب شهری به مجموعه ای از تأسیسات و امکاناتی

* نویسنده مسئول

اصلی و اتصالات در نقاط اتصال و تجهیزات اتفاق می افتد، ناشی از ترک به دلیل فشار زیاد و یا به دلیل زنگ زدگی ایجاد می شود [۱].

بر اساس گزارش های بین المللی، در بسیاری از کشورها بین ۱۵ تا ۳۰ درصد آب تولیدی پیش از رسیدن به مصرف کننده نهایی به دلیل نشتی های پنهان از دست می رود [۲]. به همین دلیل کمبود آب به عنوان یک مشکل جدی در بسیاری از کشورها شناخته شده است. بر اساس گزارش IWMI، در میان کشورهایی که مورد بررسی قرار داده اند، تنها ۲۸ درصد از جمعیت تا سال ۲۰۲۵ با کمبود آب مواجه خواهند شد [۳]. این تلفات نه تنها منجر به هدررفت منابع آبی و انرژی مصرفی در فرآیند پمپاژ و تصفیه می شود، بلکه با کاهش فشار شبکه، افزایش احتمال آلودگی آب شرب و تحمیل هزینه های سنگین تعمیر و نگهداری همراه است [۴].

حفاری از اهمیت حیاتی برخوردار است. حفاری کور و بدون تشخیص دقیق محل آسیب لوله، علاوه بر افزایش هزینه ها، موجب تخریب زیرساخت های شهری، ایجاد اختلال در ترافیک و نارضایتی اجتماعی می شود [۵]. به همین دلیل، توسعه و به کارگیری روش های غیرمخرب نشتی یابی به یکی از محورهای اصلی پژوهش های مهندسی آب و مکانیک تبدیل شده است. روش های متداول نشتی یابی شامل روش های آکوستیک، همبستگی صوتی، روش های مبتنی بر گاز ردیاب، تصویربرداری حرارتی و اخیراً روش های ارتعاشی و دینامیکی هستند [۶]. هر یک از این روش ها بر پایه یک پدیده فیزیکی مشخص عمل می کنند و عملکرد آن ها به عواملی نظیر جنس لوله، فشار سیال، عمق دفن، نوع خاک و شرایط محیطی وابسته است. به

عنوان مثال، روش های آکوستیک در لوله های فلزی با فشار بالا کارایی مطلوبی دارند، اما در لوله های پلیمری یا خاک های نرم و جاذب صدا با افت دقت مواجه می شوند [۷].

در سال های اخیر، روش ارتعاشی به عنوان رویکردی نوین و مکمل برای روش های کلاسیک مطرح شده است. در این روش، نشتی به عنوان یک منبع تحریک دینامیکی در نظر گرفته می شود که باعث ایجاد ارتعاش در لوله و محیط اطراف آن می شود. تحلیل پاسخ ارتعاشی سامانه لوله-خاک می تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد وجود و محل نشتی فراهم کند [۸]. این رویکرد به ویژه در شرایطی که روش های صوتی با نویز محیطی یا تضعیف موج مواجه هستند، قابلیت بالایی از خود نشان می دهد.

با توجه به مطالعات پیشین، روش های مختلفی برای تشخیص نشتی، از جمله روش های آکوستیکی، همبستگی صوتی و روش های ارتعاشی، مورد استفاده قرار گرفته اند که هر یک متناسب با شرایط فیزیکی شبکه، جنس لوله، فشار سیال و شرایط محیطی دارای مزایا و محدودیت هایی هستند. با این حال، نتایج مطالعات پیشین نشان می دهد که انتخاب یک روش واحد نمی تواند در تمامی شرایط پاسخ گوی مسئله نشتیابی باشد. از این رو، در پژوهش حاضر یک بررسی جامع و مقایسه ای از روش های مختلف نشتیابی، با تأکید بر روش های مبتنی بر صوت و ارتعاش، و تبیین شرایط مناسب استفاده از هر روش ارائه شده است. این مقایسه می تواند به درک بهتر قابلیت ها و محدودیت های روش های موجود و انتخاب روش مناسب برای شرایط عملیاتی کمک نماید.

۲. روش ارتعاشی نشتی‌یابی^۱

۱.۲. مبانی نظری

در پدیده نشتی از لوله‌های تحت فشار، خروج سیال باعث ایجاد آشفتگی موضعی، افت فشار و تولید نیروهای ناپایدار روی دیواره لوله می‌شود. این نیروها به صورت تحریک دینامیکی عمل کرده و منجر به تولید امواج ارتعاشی و صوتی در سامانه لوله-سیال-خاک می‌گردند. از دیدگاه مکانیکی، می‌توان لوله مدفون را به صورت یک سامانه پیوسته یا در ساده‌ترین حالت به صورت مدل جرم-فنر-میرایی معادل‌سازی کرد [۹]. معادله حرکت کلی سامانه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + k x(t) = F(t) \quad (۱)$$

که در آن m جرم معادل لوله و سیال، c ضریب میرایی معادل (شامل میرایی سازه‌ای و میرایی خاک) و k سفتی معادل ناشی از اندرکنش لوله و خاک است. نیروی تحریک $F(t)$ ناشی از جریان ناپایدار خروجی از محل نشتی بوده و معمولاً ماهیتی شبه تصادفی با مؤلفه‌های فرکانسی مشخص دارد [۱۰]. سفتی خاک تابعی از مدول برشی خاک، عمق دفن و قطر لوله است. در حوزه فرکانس، پاسخ سامانه با استفاده از تبدیل فوریه سریع تحلیل می‌شود. چگالی طیفی توان (PSD) سیگنال ارتعاشی ابزار اصلی برای شناسایی باندهای فرکانسی مرتبط با نشتی است [۱۱]. مطالعات نشان می‌دهند که نشتی‌ها معمولاً در بازه فرکانسی پایین‌تر نسبت به نویزهای محیطی غالب ظاهر می‌شوند.

۲.۲. تحلیل انتشار موج در سامانه لوله-سیال

برای درک عمیق‌تر رفتار ارتعاشی نشت، سرعت انتشار موج در یک لوله مدفون مستتر در خاک، تنها تابع صلبیت دیواره لوله نیست، بلکه به اثرات اینرسی

سیال و اندرکنش خاک نیز وابسته است. بر اساس پژوهش‌های لانگ^۲ و برنان^۳ و همکاران آنها، سرعت موج ارتعاشی آکوستیکی در لوله‌های واقع در محیط ساختاریافته از رابطه کورتوگ^۴ اصلاح‌شده پیروی می‌کند:

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{1 + \frac{B.D}{E.h} \cdot \psi}} \quad (۲)$$

که در آن:

- c_0 سرعت صوت در سیال آزاد (برای آب حدود ۱۴۸۰ متر بر ثانیه).
- B مدول حجمی سیال^۵.
- D قطر متوسط لوله، h ضخامت دیواره لوله و E مدول یانگ جنس لوله است.
- ψ ضریب تصحیح اندرکنش مکانیکی خاک و مهاربندی لوله است.

در لوله‌های فلزی به دلیل بزرگ بودن E ، مخرج کسر به یک نزدیک شده و سرعت انتشار موج بالا می‌رود. اما در لوله‌های پلاستیکی (PVC و پلی‌اتیلن)، مدول یانگ کوچک بوده و در نتیجه سرعت موج به شدت افت می‌کند^۶. علاوه بر کاهش سرعت، ضریب تضعیف موج (α) در حوزه فرکانس (ω) برای لوله‌های پلاستیکی مدفون به صورت مستقیم با فرکانس متناسب است:

$$\alpha(\omega) = \frac{\omega \cdot \eta}{2c} \quad (۳)$$

که در آن η نرخ اتلاف هیستریزس لوله و اسکوالاستیک و خاک اطراف است. این رابطه ریاضی اثبات می‌کند که چرا خاک مانند یک فیلتر پایین‌گذر عمل کرده و ارتعاشات فرکانس بالا (بالای ۵۰۰ هرتز) را در

مسافت‌های کوتاه در لوله‌های پلاستیکی کاملاً مستهلک می‌کند [۱۷، ۱۹].

۳.۲. شیوه کار

روش ارتعاشی بر اساس تحلیل نیروهای دینامیکی و ارتعاشات ایجادشده در لوله مدفون عمل می‌کند. نشتی به‌عنوان یک منبع تحریک شبه‌تصادفی ارتعاشاتی با فرکانس‌ها و دامنه‌های مشخص تولید می‌کند که توسط حسگرهایی مثل شتاب‌سنج‌ها و ژئوفون‌ها ثبت می‌شوند [۱۲].

شرکت‌های دانش بنیان ایرانی متنوعی وجود دارند که تولید کننده دستگاه‌های ژئوفون هستند. یکی از فواید دیگر ژئوفون‌ها سهولت فراگیری نحوه کار با آنهاست. با توجه به نکات ارائه شده‌ی فوق‌الذکر، یکی از راه‌های کاهش و کنترل میزان نشت آب می‌تواند استفاده از ژئوفون ایرانی و تشخیص محل دقیق نشت باشد. به این دلیل بهتر است از ژئوفون‌ها بیشتر بهره برد که لرزه‌های اضافی ناشی از فعالیت‌های ساختمانی، حمل و نقل و غیره کمتری ایجاد می‌شود. با توجه به سهولت فراگیری شیوه استفاده از این دستگاه‌ها می‌توان از ظرفیت‌های بومی هر منطقه برای اجرای عملیات بهره جست. به عنوان نمونه دستگاه نشت یاب می‌تواند در اختیار آبدار منطقه قرار داده شود و با تعریف یک اهرم تشویقی مانند اعطای پاداش نقدی به آبدار از محل کاهش هزینه‌های اعتبارات مربوط به هدررفت آب، آبدار (متصدی آب روستا) را به نشت‌یابی ترغیب نماید [۱۳].



شکل ۱. نمایی از ژئوفون و اجزای آن [۱۳]

مکانیزم عملکرد این سامانه‌ها بر پایه دریافت سیگنال‌های صوتی و ارتعاشی حاصل از خروج سیال تحت فشار استوار است. امواج ارتعاشی ناشی از نشت، پس از عبور از بدنه لوله و فیلتر طبیعی خاک، دچار تضعیف شده و عمدتاً در بازه فرکانسی پایین تا متوسط (بین ۱ تا ۵۰۰ هرتز) به حسگرها می‌رسند. با این حال، جهت حذف نویزهای فرکانس بالای محیطی (مانند ارتعاشات ناشی از ترافیک یا فعالیت‌های ساختمانی)، سیگنال‌های دریافتی توسط یک پیش‌تقویت‌کننده الکترونیکی در محدوده ۱ کیلوهرتز فیلتر و بهینه‌سازی می‌شوند. در گام بعد، با اندازه‌گیری تأخیر زمانی (ΔT) انتشار موج بین دو حسگر مجزا و با دانستن سرعت انتشار امواج در محیط، می‌توان موقعیت دقیق نشت را محاسبه نمود. از آنجایی که روش‌های سنتی نشت‌یابی به‌شدت به حواس و تفسیر اپراتور انسانی وابسته بوده و در محیط‌های پر نویز شهری مستعد خطا هستند، امروزه با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته پردازش سیگنال، فیلترینگ دیجیتال و اتوماسیون محاسباتی، تحلیل‌های کامپیوتری جایگزین شنود انسانی شده و دقت مکان‌یابی نشت به شکل چشمگیری افزایش یافته است [۱۴].

نشان‌دهنده نسبت ولتاژ خروجی به سرعت حرکت زمین است، به صورت زیر استخراج می‌گردد [۲۴]:

$$H(s) = \frac{G \cdot s^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (5)$$

که در آن:

- G ضریب حساسیت ژئوفون.
- $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ فرکانس طبیعی ژئوفون.
- $\zeta = \frac{c}{\sqrt{2k}}$ ضریب میرایی سامانه است.

این تابع تبدیل و نمودار پاسخ فرکانسی حاصل از آن نشان می‌دهد که ژئوفون مانند یک فیلتر بالاگذر عمل می‌کند. در فرکانس‌های بسیار پایین‌تر از فرکانس طبیعی، ولتاژ خروجی به شدت افت کرده و متناسب با میزان تغییرات شتاب زمین می‌شود. اما در فرکانس‌های بالاتر از فرکانس طبیعی، پاسخ فرکانسی کاملاً تخت شده و ولتاژ خروجی مستقیماً و به صورت خطی با سرعت ارتعاش زمین رابطه دارد.

از آنجایی که امواج نشت در خاک‌های نرم و لوله‌های غیرفلزی به شدت تضعیف شده و فرکانس آن‌ها به بازه ۱۰ تا ۱۰۰ هرتز محدود می‌شود، انتخاب ژئوفون با فرکانس طبیعی بسیار پایین (معمولاً بین ۴.۵ تا ۱۰ هرتز) الزامی است [۲۵]. این ویژگی بارز ژئوفون‌ها، آن‌ها را در فرکانس‌های پایین نسبت به شتاب‌سنج‌های پیزوالکتریک متداول (که در فرکانس‌های زیر ۲۰ هرتز دچار افت شدید نسبت سیگنال به نویز می‌شوند) به ابزاری به مراتب کارآمدتر برای نشت‌یابی سطحی تبدیل کرده است [۲۶].



شکل ۲. نحوه استفاده از ژئوفون در نشت‌یابی شبکه توزیع [۱۵]

۴.۲. مکانیزم الکترومکانیکی ژئوفون

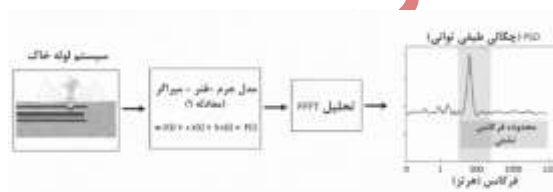
در روش‌های ارتعاشی سطحی، ژئوفون به عنوان یک مبدل سرعت^۷ پسیو، نقشی کلیدی در پایش ارتعاشات ضعیف نشت منتقل‌شده به خاک ایفا می‌کند. ساختار داخلی یک ژئوفون شامل یک جرم مغناطیسی (آهنربا) است که توسط یک فنر با سفتی و میرایی مشخص در داخل یک کوئل سیم‌پیچ که به بدنه حسگر متصل است، تعلیق شده است. با رسیدن امواج مکانیکی نشت به سطح زمین، بدنه حسگر و کوئل حرکت می‌کنند، در حالی که جرم مغناطیسی به دلیل اینرسی تمایل به سکون دارد. این حرکت نسبی، بر اساس قانون القای فارادی، ولتاژی متناسب با سرعت نسبی ایجاد می‌کند. معادله دیفرانسیل حاکم بر حرکت نسبی جرم درون ژئوفون (x_g) نسبت به حرکت زمین (x_r) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$m \ddot{x}_r(t) + c \dot{x}_r(t) + k x_r(t) = -m \ddot{x}_g(t) \quad (4)$$

با انتقال این معادله به حوزه فرکانس (تبدیل لاپلاس)، تابع تبدیل پاسخ فرکانسی ژئوفون که

۵.۲. تحلیل ریاضی

سامانه لوله-خاک را می‌توان با مدل جرم-فنر-میرایی ساده‌سازی کرد که محاسبات آن از معادله شماره ۱ پیروی می‌کند. پاسخ سامانه با تبدیل فوریه سریع تحلیل شده و PSD سیگنال برای تشخیص فرکانس‌های ناشی استفاده می‌شود. ارتعاشات ناشی از ناشی معمولاً در فرکانس‌های پایین تا متوسط (۱-۵۰۰ هرتز) ظاهر می‌شوند [۱۱].



شکل ۳. نمودار جریانی استخراج مشخصات فرکانسی نشت از مدل جرم-فنر-دمپر معادل

۶.۲. مزایا

استفاده از روش ارتعاشی در شبکه‌های انتقال، مزایای متعددی را به همراه دارد که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به حساسیت بالا در شناسایی نشت لوله‌های پلیمری حتی در شرایط فشار پایین اشاره کرد. این فناوری‌ها با کاهش نیاز به حفاری‌های گسترده، موجب به حداقل رساندن اختلال در شبکه و زیرساخت‌های شهری می‌شوند. همچنین، تلفیق این رویکردها با روش‌های صوتی، دقت تشخیص را به شکل قابل توجهی افزایش داده و راهکاری کارآمد و هوشمندانه برای مدیریت نگهداری خطوط لوله ارائه می‌دهد.

۳. روش آکوستیک^۸

روش آکوستیک مبتنی بر ثبت امواج صوتی ناشی از جریان سیال نشت‌کننده است. کلید اصلی این روش استفاده از دستگاه‌های شنود الکتریکی تقویت‌شده است. این دستگاه باید شامل یک میکروفون زمینی با پوشش آکوستیکی باشد که ظاهری شبیه به پای فیل دارد. کارگر در اطراف ناحیه مشکوک به نشت حرکت می‌کند و با استفاده از دستگاه شنود، صدای نشت زیرزمین را گوش می‌دهد و با مشخص کردن نقطه‌ای که بیشترین شدت صدا را دارد، محل نشت را تعیین می‌کند. فرآیند تشخیص در شکل ۴ نشان داده شده است.

برای اثربخشی و ایمنی در شنیدن صدای نشت، کارگران باید از هدفون متصل استفاده کنند. هنگام جستجوی صدای نشت، حجم صدا باید با دقت تنظیم شود تا بدون آسیب رساندن به شنوایی، صدا تشخیص داده شود. همچنین باید توجه داشت که هنگام جابه‌جایی میکروفون، آن را در حالت بی‌صدا^۹ قرار دهند.

این روش معایب خاصی نیز دارد. برای تعیین دقیق محل نشت به نیروی انسانی زیادی نیاز است، زیرا کارگران باید در سطح وسیعی راه بروند و به صدا گوش دهند. علاوه بر این، نقطه‌ای که بیشترین شدت صدا را دارد الزاماً محل دقیق نشت نیست؛ چرا که ساختار لوله در زیر زمین مشخص نیست و صدای نشت معمولاً بیشتر در امتداد لوله منتشر می‌شود تا در خاک اطراف آن. همان‌طور که برخی پژوهشگران اشاره کرده‌اند، نرخ موفقیت این روش کمتر از ۳۰ درصد است [۱۶].

وسیع^{۱۲} تولید می‌کند. ارتعاشات این نویز صوتی، دیواره لوله را تحریک کرده و امواج خمشی و طولی را در بدنه لوله به راه می‌اندازد. از آنجا که دامنه این امواج با توان سوم سرعت سیال رابطه مستقیم دارد، افت فشار شبکه (که کاهش سرعت را در پی دارد) به شدت دامنه سیگنال‌های آکوستیکی را کاهش داده و نشتیابی را در شبکه‌های کم‌فشار با چالش جدی مواجه می‌سازد [۲۳].

۴. روش همبستگی صوتی

باتوجه به اینکه در مرجع [۱۸] روش همبستگی نویز به عنوان بهترین روش تشخیص نشت برای لوله‌های فلزی معرفی شده است می‌توان این ادعا را این‌گونه اثبات کرد که در لوله‌های پلاستیکی PVC تضعیف سیگنال زیاد است و بخش بیشتری از انرژی ارتعاشی در لوله و خاک اطراف مستهلک می‌شود. همچنین این لوله‌ها در برابر پدیده تشدید آسیب‌پذیرتر هستند که می‌تواند باعث ایجاد خطا در تعیین زمان تأخیر شود [۱۹].

در آزمون معمول همبستگی نویز، دو شتاب‌سنج بر روی دو شیر متفاوت نصب می‌شوند. نویز یکسانی که توسط نشت ایجاد می‌شود، ابتدا به نقطه A می‌رسد و سپس با یک تأخیر زمانی به نقطه B می‌رسد. هر دو شتاب‌سنج سیگنال را دریافت کرده و داده‌ها توسط ثبت‌کننده داده^{۱۳} جمع‌آوری می‌شوند.

سیگنال‌های دریافتی توسط حسگرها همواره با نویزهای استوکاستیک (تصادفی) محیطی آمیخته هستند. بر اساس مدل ارائه شده توسط El-Zahab و همکاران، سیگنال‌های دو حسگر به صورت زیر تفکیک و تحلیل می‌شوند:



شکل ۴. دستگاه شنود زمینی برای تعیین دقیق محل نشت [۱۷]

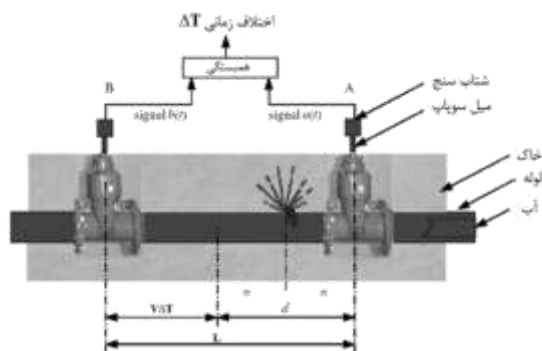
لازم به ذکر است که اندازه‌گیری‌های صوتی برای شناسایی و تعیین دقیق مکان‌های نشتی در خطوط لوله گاز و مایع برای سال‌های متمادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اولین دستگاه صوتی برای تشخیص دقیق نشتی در خطوط لوله مدفون در سال ۱۹۳۵ توسط Wilsky به ثبت رسید [۱].

۱.۳. تولید صدا در محل نشت

نویز آکوستیکی نشت در اثر پدیده جت سیال^{۱۰} و ایجاد آشفستگی^{۱۱} در محل خروج آب از روزنه لوله تولید می‌شود. این پدیده فیزیکی به شدت به عدد رینولدز (Re) جریان نشت وابسته است. بر اساس تئوری آکوستیک ساختاری، توان آکوستیکی تولید شده توسط نشت از رابطه زیر پیروی می‌کند:

$$W_{acoustic} \propto \rho f \cdot A \cdot U^3 \cdot M^n \quad (۶)$$

که در آن A مساحت روزنه نشت، U سرعت خروج سیال، M عدد ماخ جریان در روزنه و n ضریب توان آکوستیکی (معمولاً بین ۳ تا ۵ بستگی به ساختار جت) است. جریان آشفته ایجاد شده، یک نویز با پهنای باند



شکل ۵. مدل سازی روش همبستگی صوتی [۲۰]

۵. روش تشخیص نشت درون لوله‌ای با استفاده از

پیگ^{۱۶}

روش تشخیص نشت درون لوله‌ای شامل ارسال یک ربات جمع‌آوری داده با حرکت آزاد در داخل لوله است. این نوع ربات، در طول سامانه لوله‌کشی آب حرکت می‌کند و نیروی محرکه آن از فشار آب تأمین می‌شود؛ به این صورت که آب، پیگ را به جلو می‌راند.

برای بازیابی پیگ، کارگران می‌توانند در نقطه خروجی از یک تله استفاده کنند تا آن را بگیرند، یا با باز کردن شیر آتش‌نشانی، اجازه دهند آب ربات را به بیرون هدایت کند. پیگ‌ها به حسگرهایی مجهز هستند که هنگام مواجهه با نشت، سیگنال خروجی تولید می‌کنند. این حسگرها می‌توانند شامل دوربین کوچک، هیدروفون زیرآبی یا غشا^{۱۷} باشند [۲۱]. در صورتی که ظرفیت باتری، حافظه ذخیره‌سازی و ابعاد سازه اجازه دهد، می‌توان چندین حسگر روی یک پیگ نصب کرد تا قابلیت اطمینان تشخیص افزایش یابد.

در لوله‌های کوتاه (مانند شکل ۶)، نیاز به تعیین موقعیت وجود ندارد. اما در لوله‌های اصلی طولانی‌تر و پیچیده‌تر، استفاده از یک سامانه مکان‌یابی ضروری است. سامانه مکان‌یابی برای گزارش موقعیت ربات در

$$x_1(t) = s(t) + n_1(t) \quad (7)$$

$$x_2(t) = \alpha \cdot s(t - \Delta T) + n_2(t) \quad (8)$$

که در آن $s(t)$ سیگنال فیزیکی نشت، $n_1(t)$ و $n_2(t)$ نویزهای محیطی ناهمبسته، α ضریب تضعیف دامنه موج در طول مسیر و ΔT اختلاف زمان تاخیر واقعی است [۱۸].

برای استخراج دقیق این تاخیر زمانی در مجله‌های تخصصی صوت، استفاده از تابع همبستگی متقابل تعمیم‌یافته^{۱۴} با وزن‌دهی پیش‌فیلتر فاز الزامی است:

$$R_{x_1x_2}^{GCC}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{S_{x_1x_2}(f)}{|S_{x_1x_2}(f)|} e^{j2\pi f\tau} df \quad (9)$$

در این رابطه، $S_{x_1x_2}(f)$ چگالی طیف توان متقابل سیگنال‌ها است. فیلتر PHAT با نرمال‌سازی دامنه، اثرات تشدید بدنه لوله را خنثی کرده و تنها روی اطلاعات فاز تمرکز می‌کند. این امر باعث ایجاد یک پیگ^{۱۵} کاملاً تیز در نمودار همبستگی در نقطه $\tau = \Delta T$ می‌شود که خطای محاسباتی مکان نشت را در محیط‌های شهری به شدت کاهش می‌دهد [۱۹].

این روش نیز دارای معایب خاصی است:

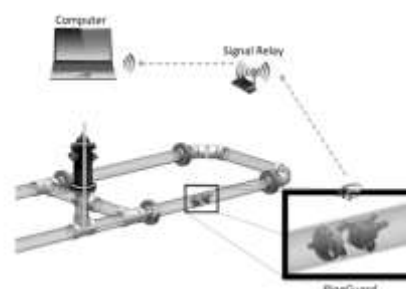
- تعیین سرعت انتشار صوت در لوله کار آسانی نیست. برآورد نادرست این سرعت می‌تواند منجر به تشخیص اشتباه شود.
- در شرایطی که چندین نشت در یک بخش متراکم وجود داشته باشد، امکان تشخیص صحیح وجود ندارد.
- نویز محیطی در مناطق شهری می‌تواند در فرآیند تشخیص اختلال ایجاد کند [۱۶].

داخل لوله، اعلام پیشرفت عملیات و کمک در شرایط بحرانی طراحی شده است.

برای مثال، در برخی موارد لوله‌های قدیمی دچار فرسودگی شده‌اند؛ ممکن است در برخی نقاط فشرده شده باشند یا رسوبات در داخل آن‌ها تجمع یافته باشد که این موارد می‌تواند باعث گیر کردن پیگ شود. در صورت بروز چنین مشکلی، چند راه‌حل قابل بررسی است:

- افزایش فشار آب برای هل دادن پیگ به جلو
- برنامه‌ریزی یک فرآیند خودتخریبی تا ربات به قطعات کوچک‌تر شکسته شود و از محل گیرکردگی عبور کند (در عین تلاش برای حفظ داده‌ها)

- بریدن لوله و حفاری برای خارج کردن ربات
- طبیعتاً هیچ‌کس راه‌حل سوم را ترجیح نمی‌دهد، زیرا نیازمند نیروی انسانی و هزینه زیاد بدون منفعت مستقیم است. با این حال، در چنین شرایطی، سامانه مکان‌یابی حداقل می‌تواند محل دقیق حفاری را مشخص کند و از کندن کل خط لوله جلوگیری نماید [۱۶].



شکل ۶. روش تشخیص نشت درون لوله‌ای با استفاده از پیگ [۲۱]

۶. روش گاز ردیاب^{۱۸}

در روش گاز ردیاب، فرآیند نشت‌یابی با تزریق

گازهای سبک و بی‌اثری مانند هلیوم یا هیدروژن به درون شبکه آغاز می‌شود. از آنجایی که این گازها غلظت بسیار کمی در جو دارند و به راحتی از کوچک‌ترین منافذ و حتی لایه‌های خاک و آسفالت عبور کرده و به سطح زمین می‌رسند، توسط حسگرهای ویژه و فوق حساس در سطح زمین شناسایی می‌شوند تا محل دقیق نشت تعیین شود. این روش اگرچه دقت بسیار بالایی در مکان‌یابی نقاط آسیب‌دیده دارد، اما به دلیل نیاز به تامین گاز، تجهیزات خاص و فرآیند اجرایی پیچیده، روشی زمان‌بر و پرهزینه محسوب می‌شود که معمولاً در موارد خاص یا برای تایید نهایی نشت‌های دشوار به کار می‌رود [۲۲].

۷. روش تصویربرداری حرارتی

این روش بر پایه شناسایی تفاوت دمای ناشی از جریان آب نشت‌کننده و محیط اطراف آن استوار است؛ چرا که خروج سیال از لوله معمولاً باعث ایجاد یک تغییر حرارتی در خاک یا سطح زمین می‌شود. این روش به‌ویژه برای لوله‌های کم‌عمق کارایی مناسبی دارد و امکان پایش سریع سطوح وسیع را بدون تماس مستقیم فراهم می‌کند. با این حال، بزرگ‌ترین محدودیت این روش وابستگی شدید به شرایط محیطی و تغییرات دمای اتمسفر است که می‌تواند دقت تشخیص را تحت تأثیر قرار داده و تفکیک میان نشت واقعی و تغییرات دمایی طبیعی زمین را دشوار سازد.

۸. مقایسه روش‌ها

برای ارزیابی جامع روش‌های نشت‌یابی، مزایا و معایب هر روش در جدول شماره ۱ مقایسه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که هیچ روش واحدی در تمامی شرایط برتری مطلق ندارد و انتخاب بهینه باید بر اساس شرایط فنی و اقتصادی انجام شود.

جدول ۱ - مزایا و معایب روش های نشت یابی [۱]

روش	مزایا	معایب
ارتعاشی	توانایی شناسایی نشت های عمیق و دور از سطح بدون نیاز به حفاری در شبکه لوله کشی قابلیت شناسایی نشت های در زمان واقعی استفاده از تجهیزات قابل حمل و ساده کم هزینه نسبت به روش های دیگر	دقت پایین تر در مقایسه با روش های دیگر مانند گاز ردیاب نیاز به تجربه بالا برای تجزیه و تحلیل داده ها حساسیت به نویزهای محیطی و اختلالات محدودیت در شناسایی نشت های بسیار کوچک تأثیر شرایط جوی بر نتایج وابسته به مهارت های اپراتور برای نشت های کوچک قابل اتکا نیست. تحت تأثیر نویز پس زمینه قرار می گیرد. وابسته به اندازه، مواد لوله مکان دقیق لوله ها باید شناخته شده باشد. مناسب برای سطوح سخت عمق کمتر از ۲ متر
آکوستیک	بیشترین استفاده دقت قابل قبول سادگی حمل و نقل	وابسته به مهارت های اپراتور برای نشت های کوچک قابل اتکا نیست. تحت تأثیر نویز پس زمینه قرار می گیرد. وابسته به اندازه، مواد لوله مکان دقیق لوله ها باید شناخته شده باشد. مناسب برای سطوح سخت عمق کمتر از ۲ متر
همبستگی صوتی	دقت خوب قیمت قابل قبول نیاز حداقلی به آموزش اپراتورها	نشت باید بین دو حسگر اتفاق بیفتد. دقت بر اساس وارد کردن دقیق ابعاد و مواد لوله وابسته است. برای لوله های پلاستیکی مناسب نیست. تماس خوب حسگر مهم است. دقت بستگی به نزدیکی نشت به نقاط اندازه گیری دارد. گاهی اوقات دسترسی به لوله نزدیک به نشت وجود ندارد.
تشخیص نشت درون لوله ای با استفاده از پیگ	قابلیت شناسایی نشت ها در تمام طول لوله دقت بالا در شناسایی محل دقیق نشت امکان بررسی وضعیت داخلی لوله و شناسایی مشکلات دیگر مانند خوردگی قابل استفاده در لوله های بزرگ عدم نیاز به تخریب یا حفاری	هزینه بالا برای خرید و نگهداری دستگاه نیاز به فشار داخلی برای حرکت پیگ در لوله محدودیت در استفاده از پیگ در لوله های دارای انحنای شدید نیاز به زمان و منابع برای راه اندازی خطر گیر کردن پیگ در برخی شرایط خاص لوله
گاز ردیاب	دقت بالا در مکان یابی نشت ها ساده و سریع شناسایی نشت های زیر سطح زمین عدم نیاز به دستکاری شبکه دقت بالا در تشخیص دقیق محل نشت	هزینه بالا نیاز به تجهیزات خاص نیاز به شرایط محیطی خاص پخش سریع گاز محدودیت در نوع لوله ها و محل ها
تصویر برداری حرارتی	بدون تماس و خرابی قابلیت بررسی مناطق بزرگ از سطح زمین با پوشش ۱۰۰ درصد تعیین مکان نشت های زیر سطحی و قابلیت برای تعیین مکان خلا و فرسایش اطراف لوله ها	نیاز به تجربه قابل توجه اپراتور شناسایی بستگی به ویژگی های خاک و اندازه نشت و عمق دفن لوله دارد. کاربرد تحت شرایط محیطی محدود است.

اقتصادی (هزینه سرمایه گذاری اولیه، هزینه عملیاتی و ارزش آب تلف شده) است.

- لوله های فلزی (چدن داکتیل و فولاد): به دلیل

انتخاب روش بهینه نشت یابی در شبکه های توزیع آب شهری، نیازمند ارزیابی همزمان پارامترهای فنی (جنس لوله، فشار شبکه، عمق دفن) و ارزیابی های

بالا بودن سرعت انتشار امواج صوتی^{۲۲} و تضعیف پایین، استفاده از روش همبستگی صوتی^{۲۳} اقتصادی‌ترین و دقیق‌ترین گزینه است. اگرچه هزینه اولیه دستگاه همبسته‌ساز بالاست، اما به دلیل سرعت بالای پایش و عدم نیاز به حفاری‌های متعدد، هزینه کل عملیات نشت‌یابی را تا ۶۰ درصد کاهش می‌دهد.

- **لوله‌های پلیمری:** در این لوله‌ها به دلیل مدول یانگ پایین^{۲۴} و تضعیف شدید امواج آکوستیکی فرکانس بالا (طبق رابطه ۳)، روش‌های آکوستیک کلاسیک بازدهی کمتر از ۳۰ درصد دارند. در این شرایط، روش ارتعاشی با حسگرهای ژئوفون (بازه فرکانسی زیر ۵۰ هرتز) توجیه کاربردی و اقتصادی بالایی دارد؛ زیرا ژئوفون‌ها با ثبت سرعت ارتعاش زمین در فرکانس‌های پایین، مانع از گمراهی ناشی از فیلتر شدن امواج صوتی در خاک می‌شوند.
- **خطوط انتقال اصلی و طولانی (قطرهای بزرگ):** استفاده از روش پیگ درون‌لوله‌ای با وجود هزینه بالای خرید و نگهداری، برای خطوط انتقال بین‌شهری که دسترسی سطحی به آن‌ها محدود است، یک راهکار دارای توجیه فنی است. در مقابل، برای شبکه‌های توزیع مویرگی شهری به دلیل وجود زانو‌ها و شیرآلات فراوان، ریسک گیر کردن پیگ زیاد بوده و اقتصادی نیست.
- **نشت‌های ریز و پنهان:** روش گاز ردیاب دارای بالاترین دقت عددی است اما به دلیل نیاز به قطع جریان آب و هزینه تامین گاز تزریقی، صرفاً به عنوان روش مکمل و نهایی توجیه اقتصادی پیدا می‌کند.

۹. تحول نشت‌یابی با هوش مصنوعی

با توسعه زیرساخت‌های هوشمند و افزایش دسترسی به داده‌های حاصل از حسگرهای برخط، انتظار می‌رود روش‌های نشت‌یابی در آینده از رویکردهای مبتنی بر تفسیر مستقیم سیگنال‌ها به سمت سامانه‌های هوشمند، خودکار و داده‌محور حرکت کنند. در این میان، هوش مصنوعی و به‌ویژه روش‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق می‌توانند نقش مهمی در پردازش و تفسیر سیگنال‌های آکوستیکی، ارتعاشی، فشار و دبی داشته باشند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که مدل‌های یادگیری ماشین می‌توانند به‌عنوان جایگزینی برای برخی روش‌های سنتی، در تشخیص نشتی از داده‌های آکوستیکی مورد استفاده قرار گیرند [۲۷].

یکی از روندهای نوظهور، استفاده از یادگیری عمیق برای تحلیل مستقیم سیگنال‌های آکوستیکی و ارتعاشی است. در این روش‌ها، به جای اتکا به شاخص‌هایی مانند دامنه، چگالی طیفی توان یا زمان تأخیر، ویژگی‌های پیچیده‌تر سیگنال به‌صورت خودکار استخراج و برای تشخیص یا مکان‌یابی نشتی استفاده می‌شوند. با این حال، یکی از محدودیت‌های مهم مدل‌های یادگیری ماشین، نیاز به تعداد قابل توجهی داده برچسب‌گذاری‌شده برای آموزش است. در همین راستا، لیو^{۱۹} و همکاران [۲۷] با استفاده از روش یادگیری کنتراستی نشان دادند که می‌توان با داده‌های برچسب‌گذاری‌شده محدود نیز مدل‌های مناسب برای تشخیص نشتی ایجاد کرد و قابلیت تعمیم مدل را در خطوط لوله بررسی‌نشده بهبود داد. این موضوع می‌تواند برای شبکه‌های واقعی آب که در آن جمع‌آوری داده‌های نشتی با برچسب دقیق دشوار و پرهزینه است،

اهمیت ویژه‌ای داشته باشد.

از سوی دیگر، ساختار شبکه‌ای خطوط توزیع آب سبب شده است که شبکه‌های عصبی گرافی به یکی از مسیرهای جدید پژوهشی در زمینه نشت‌یابی تبدیل شوند. در این رویکرد، شبکه توزیع آب به صورت یک گراف شامل گره‌ها و لوله‌ها نمایش داده می‌شود و اطلاعات فشار، دبی و سایر پارامترهای اندازه‌گیری شده به عنوان ویژگی‌های گره‌ها وارد مدل می‌شوند. پژوهش‌هایی در این زمینه وجود دارد که یک مدل شبکه عصبی گرافی کانولوشنی را برای تشخیص نشتی در سطح قطعه لوله ارائه کردند که با استفاده از ویژگی‌های شبکه و داده‌های شبیه‌سازی شده و واقعی، امکان تشخیص نشتی را حتی در شرایط تراکم پایین تجهیزات پایش، بررسی کرده است [۲۸]. این رویکرد می‌تواند در آینده برای شبکه‌هایی که امکان نصب حسگر در تمام نقاط آن‌ها وجود ندارد، اهمیت بیشتری پیدا کند.

یکی از چالش‌های اساسی مدل‌های کاملاً داده‌محور، وابستگی عملکرد آن‌ها به داده‌های آموزشی و کاهش قابلیت تعمیم در شرایطی است که با داده‌های آموزش تفاوت دارند. در یک پژوهش جدید، ژانگ^{۲۰} و فینک^{۲۱} [۲۹] با اشاره به این محدودیت، یک شبکه عصبی گرافی آگاه از الگوریتم را برای تشخیص و مکان‌یابی نشتی پیشنهاد کردند که در آن دانش الگوریتمی مرتبط با جریان شبکه در ساختار یادگیری وارد می‌شود. نتایج این مطالعه نشان‌دهنده بهبود قابلیت تعمیم مدل نسبت به برخی مدل‌های شبکه عصبی گرافی متداول بوده است. بنابراین، انتظار می‌رود در آینده استفاده از مدل‌هایی که علاوه بر داده، از ساختار شبکه و دانش مهندسی نیز بهره می‌گیرند،

توسعه بیشتری پیدا کند.

مسیر مهم دیگر، ترکیب یادگیری ماشین با مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی شبکه است. در این روش، قوانین فیزیکی حاکم بر جریان سیال و رفتار شبکه در کنار داده‌های اندازه‌گیری شده در فرآیند آموزش مدل مورد استفاده قرار می‌گیرند. چنین رویکردی می‌تواند وابستگی مدل به داده‌های آموزشی را کاهش داده و قابلیت تعمیم آن را در شرایط عملیاتی مختلف افزایش دهد. مطالعات اخیر دانشمندان، چارچوبی مبتنی بر یادگیری ماشین آگاه از فیزیک را برای مدل‌سازی نشتی‌های ناشی از مانور سریع شیرها ارائه کرده و امکان استفاده از این چارچوب را برای پایش برخط و مقیاس‌پذیر در محیط‌های دوقلوی دیجیتال مطرح کرده است [۳۰].

همچنین، توسعه مفهوم «دوقلوی دیجیتال» می‌تواند یکی از مهم‌ترین مسیرهای آینده در مدیریت هوشمند شبکه‌های توزیع آب باشد. در یک دوقلوی دیجیتال، مدل مجازی شبکه با استفاده از داده‌های برخط حسگرها به صورت پیوسته با وضعیت واقعی شبکه به‌روزرسانی می‌شود. ترکیب این فناوری با حسگرهای اینترنت اشیا می‌تواند زمینه را برای پایش پیوسته، تشخیص زودهنگام ناهنجاری‌ها و برنامه‌ریزی تعمیرات پیشگیرانه فراهم کند.

از سوی دیگر، یکی از جهت‌گیری‌های قابل توجه آینده، ادغام داده‌های چندحسگری است. ترکیب هم‌زمان داده‌های آکوستیکی و ارتعاشی با اطلاعات فشار، دبی، دما و موقعیت مکانی می‌تواند محدودیت‌های هر حسگر منفرد را کاهش دهد. در چنین سامانه‌ای، الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌توانند داده‌های چندمنبعی را به صورت هم‌زمان

تحلیل کرده و با تفکیک الگوی واقعی نشتی از نویزهای محیطی، احتمال وقوع و محل آن را با اطمینان بیشتری تعیین کنند. این موضوع به ویژه برای لوله های پلیمری، شبکه های کم فشار و محیط های شهری پرنویز که روش های متداول آکوستیکی و ارتعاشی با محدودیت مواجه هستند، اهمیت بیشتری خواهد داشت.

با وجود ظرفیت بالای هوش مصنوعی، جایگزینی کامل روش های فیزیکی و تجربی موجود با مدل های داده محور را نمی توان رویکرد مطلوبی برای آینده دانست. تفاوت شرایط واقعی شبکه ها، تغییر جنس و قطر لوله، شرایط خاک، فشار کاری، اندازه نشتی و سطح نویز محیطی می تواند موجب کاهش عملکرد مدل های آموزش دیده شود. بنابراین، به نظر می رسد آینده این حوزه بیشتر به سمت سامانه های ترکیبی حرکت خواهد کرد؛ سامانه هایی که در آن اندازه گیری های آکوستیکی و ارتعاشی، مدل های هیدرولیکی و فیزیکی، الگوریتم های یادگیری ماشین و زیرساخت های ارتباطی در یک چارچوب یکپارچه قرار می گیرند. در چنین شرایطی، مسیر توسعه نشتی یابی از «تشخیص پس از وقوع و وابسته به اپراتور» به سمت «پایش هوشمند، تشخیص زودهنگام، پیش بینی و نگهداری پیشگیرانه» حرکت خواهد کرد.

۱۰. نتیجه گیری

بررسی مطالعات پیشین نشان می دهد که عملکرد روش های نشتیابی به شرایط شبکه، جنس لوله، عمق دفن، فشار سیال و میزان نویز محیطی وابسته است. در روش شنود صوتی، نرخ موفقیت گزارش شده در برخی

مطالعات کمتر از ۳۰ درصد بوده است [۱۶]، که نشان دهنده محدودیت این روش در شرایط پرنویز و برای نشتی های کوچک است. در مقابل، روش های همبستگی صوتی و ارتعاشی با استفاده از تحلیل سیگنال و پردازش داده، قابلیت مکانیابی دقیق تری دارند، هرچند دقت آن ها نیز به فاصله حسگرها، مشخصات لوله و سرعت انتشار موج وابسته است [۵، ۸، ۱۹].

روش های مبتنی بر گاز ردیاب و تشخیص داخل لوله نیز از دقت بالایی در تعیین محل نشتی برخوردارند، اما هزینه تجهیزات و محدودیت های اجرایی، استفاده گسترده از آن ها را محدود می کند [۲۲]. همچنین، تصویربرداری حرارتی امکان بررسی سریع سطوح وسیع را فراهم می کند، اما دقت آن تحت تأثیر شرایط جوی، ویژگی خاک، عمق دفن و اندازه نشتی قرار دارد. بنابراین، مقایسه نتایج مطالعات نشان می دهد که هیچ یک از روش های موجود را نمی توان به عنوان روش برتر در تمامی شرایط معرفی کرد و انتخاب روش مناسب باید بر اساس شرایط فیزیکی شبکه، میزان دقت مورد نیاز و محدودیت های اجرایی انجام شود.

- [۱] فتحی، احمد، و علیرضا لویمی. ۱۴۰۲. "مروری بر روش‌های تشخیص و مکان‌یابی نشت آب در شبکه توزیع آب شهری." مجموعه مقالات اولین همایش ملی علوم و مهندسی محیط زیست در افق توسعه، ۱-۱۱.
- [2] Hunaidi, O., and W. T. Chu. 1999. *Acoustical Characteristics of Leak Signals in Water Distribution Pipes*. Ottawa: National Research Council Canada, 23-27.
- [3] Seckler, David William, David Seckler, Randolph Barker, and Upali A. Amarasinghe. 1998. *World Water Demand and Supply, 1990 to 2025: Scenarios and Issues*. Vol. 19. Colombo: International Water Management Institute (IWMI).
- [4] Colombo, A. F., P. Lee, and B. W. Karney. 2009. "A Selective Literature Review of Transient-Based Leak Detection Methods." *Journal of Hydro-Environment Research* 2 (4): 212-227, 215-218.
- [5] Li, Z., and A. J. Whittle. 2012. "Leak Detection in Buried Water Distribution Pipes Using Vibration Monitoring." *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 3 (4): 120-130, 123-125.
- [6] Lambert, Allan, Michael Fantozzi, and Jeremy Shepherd. 2014. *Practical Approaches to Water Loss Reduction*. London: IWA Publishing, 45-52.
- [7] Farley, Malcolm, and Stuart Trow. 2003. *Losses in Water Distribution Networks: A Practitioner's Guide to Assessment, Monitoring and Control*. London: IWA Publishing, 89-104.
- [8] O'Connell, P., J. C. O'Sullivan, and M. J. Clifford. 2011. "Vibration-Based Leak Detection in Water Pipelines." *Mechanical Systems and Signal Processing* 25 (5): 1767-1784, 1772-1778.
- [9] Kraus, A. 1988. *Vibration Analysis of Buried Pipes under Dynamic Loads*. New York: McGraw-Hill, 133-140.
- [10] Hunt, R., and M. Johnson. 2000. "Modeling Transient Jet Forces from Pipe Leaks." *Journal of Fluids Engineering* 122 (3): 456-462, 458-460.
- [11] Smith, D. 2012. "Power Spectral Density Analysis for Leak Detection Applications." *Journal of Sound and Vibration* 331 (3): 512-525, 518-520.
- [12] Brown, L., and P. Green. 2010. "Application of Vibration Sensors in Buried Water Pipelines." *Sensors and Actuators A: Physical* 162 (2): 345-352, 347-349.
- [۱۳] مقدم، نیما، و یوسف مقدم. ۱۴۰۲. "روش‌های نشت‌یابی لوله‌های مدفون توزیع آب." مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس بین‌المللی پژوهش در علوم و مهندسی و پنجمین کنگره بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی آسیا، ۳-۴.
- [۱۴] صیاد، علی. ۱۴۰۰. "بررسی، مطالعه و بکارگیری تکنیک‌های تست‌های غیرمخرب (NDT) در امر نشت‌یابی لوله‌ها." سمینار کارشناسی ارشد، به راهنمایی محمد ریاحی، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۳۸.
- [۱۵] تاج‌بخش، کاوه، محمدحسین شعبانی، محمدبهزاد قویم لنگرودی، و حامد منصف. ۱۴۰۳. "نشت‌یابی هدفمند جهت کاهش هدررفت واقعی، مطالعه موردی شهر لاهیجان." مجموعه مقالات پنجمین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران، اصفهان، ۵.
- [16] Wang, Tiansu. 2020. "Non-Metal Pipe Leak Detection Pig Localization Method." Master's thesis, Northeastern University, 3-7.
- [17] Long, Rob, Peter Cawley, and Mike Lowe. 2003. "Acoustic Wave Propagation in Buried Iron Water Pipes." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 459 (2039): 2749-2770.
- [18] El-Zahab, Samer, Eslam Mohammed Abdelkader, and Tarek Zayed. 2018. "An Accelerometer-Based Leak Detection System." *Mechanical Systems and Signal Processing* 108: 276-291.

- [19] Almeida, Fabricio C. L., Michael J. Brennan, Phillip F. Joseph, Yan Gao, and Amarildo T. Paschoalini. 2018. "The Effects of Resonances on Time Delay Estimation for Water Leak Detection in Plastic Pipes." *Journal of Sound and Vibration* 420: 315–329.
- [20] Gutermann Water Loss. 2019. *Modern Ground-Borne Sound Microphone and C-3 Hybrid Correlator in One*. Company Product Manual, Gutermann AG.
- [21] Chatzigeorgiou, Dimitris M., You Wu, Kamal Youcef-Toumi, and Rached Ben-Mansour. 2013. "Reliable Sensing of Leaks in Pipelines." *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* 8: 12–18.
- [22] Wang, H., Y. Chen, and J. Li. 2014. "Tracer Gas and Infrared Thermography Methods for Pipeline Leak Detection." *NDT & E International* 62: 1–8, 4–6.
- [23] Mutinga, N. M., M. J. Brennan, and A. C. Tan. 2022. "On the Generation of Acoustic Noise by a Leak in a Plastic Water Pipe." *Applied Acoustics* 185: 108412.
- [24] Sambuelli, L., and G. M. Deidda. 2015. "Response of a Geophone to a Seismic Wave: A Review of the Transfer Function." *Journal of Applied Geophysics* 115: 120–132.
- [25] Hunaidi, O., and W. T. Chu. 1999. "Acoustic Characteristics of Leak Signals in Plastic Water Distribution Pipes." *Applied Acoustics* 58 (3): 235–254.
- [26] Muggleton, J. M., and M. J. Brennan. 2004. "Leak Detection in Plastic Water Pipes: An Experimental Study of the Propagation of Leak Signals." *Journal of Sound and Vibration* 270 (1-2): 37–56.
- [27] Liu, R., T. Zayed, and R. Xiao. 2024. "Contrastive Learning Method for Leak Detection in Water Distribution Networks." *npj Clean Water* 7 (1): 118.
- [28] Li, X., and Y. Wu. 2024. "A Convolutional Graph Neural Network Model for Water Distribution Network Leakage Detection Based on Segment Feature Fusion Strategy." *Water* 16 (24): 3555.
- [29] Zhang, Z., and O. Fink. 2026. "Algorithm-Informed Graph Neural Networks for Leakage Detection and Localization in Water Distribution Networks." *Reliability Engineering & System Safety* 265: 111494.
- [30] Garzón-Orduña, A. J., O. E. Coronado-Hernández, A. Arrieta-Pastrana, H. M. Ramos, and M. Pérez-Sánchez. 2026. "Physics-Informed Machine Learning for Hybrid Modelling of Water Leakages Induced by Rapid Valve Manoeuvres in Water Distribution Networks." *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 167: 113887.

پی نوشت

-
1. Vibration-based Leak Detection
 2. Long
 3. Bernnan
 4. Korteweg
 5. Bulk Modulus
 6. $c \approx 300 - 500 \text{ m/s}$
 7. Velocity Transducer
 8. Acoustic Leak Detection
 9. Mute
 10. Fluid Jet
 11. Turbulence
 12. Broadband White Noise
 13. Data Logger
 14. GCC

-
15. Peak
 16. Pig
 17. Membrane
 18. Tracer Gas
 19. Liu
 20. Zhang
 21. Fink
 22. $c \approx 1000 - 1400 \text{ m/s}$
 23. Correlative
 24. $E \approx 0.8 - 3 \text{ GPa}$

نسخه قبل از ویراستاری